doi:10.13866/j.azr.2020.01.01

樟子松固沙林土壤理化特性对林分密度的响应①

于东伟[1]， 雷泽勇[1]， 赵国军[2]， 张岩松[3,4]， 于德良[1]，
白津宁[1]， 李 尧[1]

（1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院，辽宁 阜新 123000；
2. 辽宁省沙地治理与改良利用研究所，辽宁 阜新 123000；
3. 中国科学院沈阳应用生态研究所大青沟沙地实验站，辽宁 沈阳 110016；4. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 为了研究樟子松人工固沙林林分密度对土壤理化特性的影响，在章古台地区选取林分密度分别为625(P_1)、775(P_2)、1 025(P_3)、1 175(P_4)株·hm^{-2}和1 250(P_5)株·hm^{-2}的樟子松中龄林(林龄为23～27 a)为研究对象，对0～100 cm深度的樟子松林地土壤按0～10、10～20、20～40、40～60、60～80、80～100 cm进行分层，分析其理化特性。结果表明：0～10 cm土层全氮和20～40 cm土层土壤容重随密度增加呈上升趋势，P_5显著高于P_1($P<0.05$)；0～80 cm土层全钾和0～60 cm土层pH随密度增加先升高后降低，P_3最高，且P_3样地全钾在10～60 cm土层显著高于P_1($P<0.05$)；pH在0～40 cm土层显著高于其他样地($P<0.05$)；0～10 cm土层全磷随密度增加而减小，P_1显著高于P_3～P_5($P<0.05$)；P_4或P_5样地有效钾在0～40 cm土层显著高于P_1、P_2样地($P<0.05$)，在40～100 cm土层显著高于P_3样地($P<0.05$)；P_2～P_4样地的土壤孔隙度在40～100 cm土层低于P_1和P_5样地。综合考虑林分密度对樟子松中龄林土壤理化特性的影响，章古台地区樟子松林的合理林分密度为1 025～1 175株·hm^{-2}，可采取间伐等营林管理措施调节林分密度，确保樟子松固沙林生长具有良好的土壤条件。

关键词： 樟子松；固沙林；林分密度；土壤性质；土壤层次；章古台地区

林分密度是指单位面积林木的株数，即立木密度，是反映单位面积林木生长空间密集程度的一种数量标志[1]。林分密度是林分经营的首要环节之一，其直接影响人工林群落的光、热、水分等生态因子的分配[2]，对土壤性质、养分循环等有显著影响[3-5]。土壤养分，尤其是有机质、全氮、碱解氮和速效钾，受凋落物和林下植被影响明显[4]。随着林分密度由低到中等，凋落物量加大，养分积累也增加，林分密度进一步加大至高密度，林地光照条件变差，温度降低，枯落物分解速率降低，凋落归还给土壤的养分相应减少，枯落物分解速率的高低在一定程度上制约着林分养分循环的速率，凋落物中各种养分元素的含量对土壤肥力具有重要作用[3]。研究认为，中密度人工林林地养分含量总体较高，土壤理化特性也优于过密或过疏的林分[3-4,6]。因此，适宜林分密度的人工林一定程度上可改善林下土壤肥力及酶活性[6]。受气候、土壤、植被等的影响，树种不同，适宜的密度也不一样。如赵广亮等[3]研究认为，油松人工林密度以1 500株·hm^{-2}的养分利用率最大；康冰等[4]对广西大青山砖红壤性土上生长的14 a生马尾松人工林研究后得出，林分密度为1 800株·hm^{-2}为适宜的中密度林分。即使同一树种，发育阶段不同，中密度的含义也有区别，与康冰等的研究结果相比，赵汝东等[6]对江西赣县20 a生的马尾松林研究表明，1 560株·hm^{-2}左右中等林分密度的马尾松林地土壤有机质、全氮、全钾、速效钾、全磷、交换性钙和交换性镁等较高。

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)分布于我国大兴安岭北部山地和呼伦贝尔沙地草原，具有耐寒、耐旱、耐贫瘠和较速生等优良特性。自20世纪50年代在我国辽宁省章古台地区成功引种以来，樟子松作为优良的固沙造林树种被迅速引种栽植[7]。基于对造林成活率和保存率的考虑，樟子松固沙林初植密度均相当高，随着林龄的增长，种群密度和数量的变化严重影响了樟子松固沙林的生存状况[8-9]。张日升等[10]以胸径、树高、蓄积、干形、

① **收稿日期：** 2019-03-08； **修订日期：** 2019-08-19
基金项目： 国家自然科学基金项目(31570709)资助
作者简介： 于东伟(1994-)，女，硕士，研究方向为生态修复理论与技术研究. E-mail:1760388605@qq.com
通讯作者： 雷泽勇. E-mail:zeyonglei@163.com

松枯梢病的发病情况为指标，分析了密度对科尔沁沙地樟子松人工林生长与健康的影响，得出亚湿润干旱区樟子松人工林的造林密度可以控制在1 250～2 500 株·hm^{-2}；当樟子松人工林林龄达到21 a 时保留密度1 000 株·hm^{-2}左右；当林龄31 a时，密度控制为500 株·hm^{-2}左右。张秋良等[11]以胸径、树高、树冠为指标，对毛乌素沙地樟子松人工林研究后认为，初始密度为2 500 株·hm^{-2}，10～20 a时为830 株·hm^{-2}左右合适。曾德慧等[12]通过分析13～35 a 生的科尔沁沙地樟子松人工林，依据自疏规律提出林分最大密度，并给出了合理经营密度。上述分析发现，以土壤性质变化（变劣或变优）为中心研究樟子松固沙林的林分密度问题均较少，为此，本文以樟子松中龄林（23～27 a）林下土壤为研究对象，研究不同林分密度条件下土壤理化特性的变化规律，分析其对密度效应的响应特征，揭示林分密度变化对樟子松固沙林土壤理化特性的影响，为樟子松固沙林的科学营建、管护，以及林地土壤改良提供理论依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省固沙造林研究所章古台试验基地（42°39′～42°43′N，122°23′～122°33′E），海拔高度为（225 ±5）m。该区地处中温带大陆性季风气候，年平均气温4.6～6.3 ℃，极端最低气温 −33.4 ℃，极端最高气温43.2 ℃。年平均降水量500 mm左右，主要集中于6—8 月，年蒸发量平均在1 600 mm 左右。多年平均无霜期为154 d，年平均风速4.5 m·s^{-1}，冬夏两季长，春秋两季短，春季多大风、扬沙天气。土壤主要类型为风沙土，具有流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘和平缓沙地等地貌类型，pH 6.7 左右，代表性植物有中华委陵菜（*Potentilla anserina* Migo.）、中华隐子草（*Cleistogenes chinensis* Keng.）、小白蒿（*Artemisia frigida* Willd.）、胡枝子（*Lespedeza daurica* Turcz.）、大果榆（*Ulmus macrocarpa* Hance.）、黄柳（*Salix gordejevii* SkV.）和蒺藜梗（*Agriophyllum squarrosum* Moq.）等[7-8]。研究区营建樟子松固沙林前为固定半固定沙地，且没有进行更新。

1.2 试验地选择与土壤样品的采集

2016 年5 月，对研究区内的林地进行踏查，然后选择立地条件相似（平坦沙地）的不同密度樟子松中龄林（23～27 a）林地，同一密度设置6 个样地（6 次重复）进行采样，同时就近选择天然草地作为对照样地，所设样地营造樟子松林前均为固定沙地，所有樟子松固沙林均处于草地转化而来的第一个轮伐期内。在各个样地内进行每木检尺，记录其胸径、树高和冠幅等数据，计算平均胸径、平均树高、平均冠幅（表1），依据林分平均高选择每块标准地的标准木。

表1 标准地林分基本情况

Tab.1 Basic information of standing forest in the sample plots

样地	林龄/a	林分密度/（株·hm^{-2}）	平均树高/m	平均胸径/cm	平均冠幅/m
P_1	23	625	5.47 ±0.01	14.71 ±0.51	4.45 ±0.17
P_2	27	775	7.50 ±0.15	14.51 ±0.51	3.51 ±0.14
P_3	27	1 025	7.93 ±0.18	14.39 ±0.40	3.08 ±0.11
P_4	27	1 175	8.97 ±0.11	14.38 ±0.40	3.39 ±0.11
P_5	27	1 250	10.23 ±0.22	14.30 ±0.41	3.07 ±0.12

注：P_1、P_2、P_3、P_4、P_5 分别代表625、775、1 025、1 175、1 250 株·hm^{-2}的樟子松林地。下同。

2016 年8 月进行土壤样品采集，在不同密度的各个样地内根据林分基本情况选定标准木，距标准木1 m 处挖掘深度为100 cm 的土壤剖面，用环刀（容积200 cm^3）收集0～10、10～20、20～40、40～60、60～80、80～100 cm 层的原状土，用于测定土壤容重和土壤孔隙度，同时在每个样地内随机选取5 个样点，按上述固定土层收集非原状土，并对相同层次的土壤样品充分混匀，用四分法留取500 g 样品，除去植物根系和石块等杂物，室温风干处理后粉碎过筛，用于土壤化学性质指标的测定。

1.3 土壤理化因子测定方法

土壤容重及土壤孔隙度采用环刀法，土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法－外加热法，土壤全氮含量采用半微量开氏法，土壤水解氮含量采用碱解扩散法，土壤全磷含量采用NaOH 熔融－钼锑抗比色法，土壤有效磷含量采用$NaHCO_3$ 法，土壤全钾含量采用NaOH 熔融－火焰光度法，土壤有效钾含量采用NH_4OAc 浸提－火焰光度法，土壤pH 值采用电位法，具体详见土壤农业化学分析常规方法[13]。

1.4 数据处理与分析

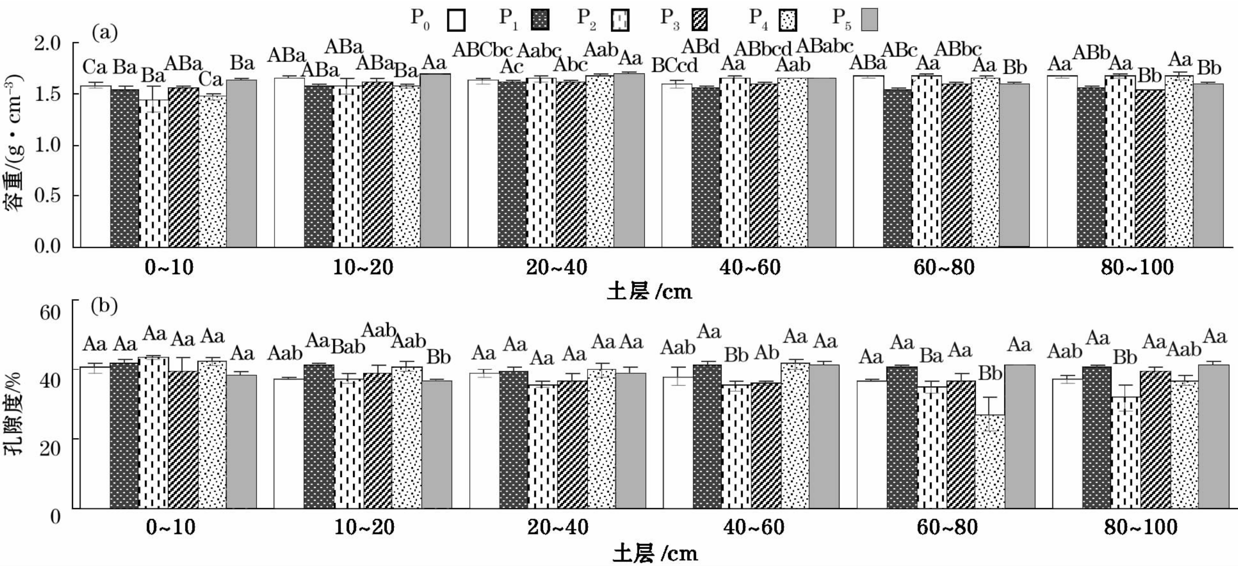
运用SPSS 20.0 软件对上述测定的数据进行统计分析，采用单因素方差分析法（one-way ANOVA）对不同林分密度在同一土层的土壤理化特性进行方

差分析,运用最小二乘法(LSD)进行多重比较分析,显著水平为 $\alpha = 0.05$。

2 结果与分析

2.1 不同林分密度樟子松林地土壤物理性质

由图 1 可以看出,不同林分密度条件下樟子松林地土壤容重和土壤孔隙度并未呈现一致的趋势和规律。在 0~10 cm 土层,不同林分密度樟子松林地土壤容重和孔隙度均无显著差异,且樟子松林地与对照草地也无显著差异($P > 0.05$);在 10~20 cm 土层,土壤容重变化趋势与 0~10 cm 土层一致,土壤孔隙度在 P_1 样地显著高于 P_5 样地($P < 0.05$),但二者与其他样地均无显著差异;在 20~40 cm 土层,随着林分密度的增加土壤容重总体呈增大趋势,P_5 样地显著高于 P_1 和 P_0 样地,而其他样地间无显著差异,土壤孔隙度变化趋势与 0~10 cm 土层一致;在 40~60 cm 土层,土壤容重分别在 P_2 和 P_1 样地有最大值和最小值,在 P_0 样地显著低于 P_2 和 P_4 样地,土壤孔隙度在 P_2 和 P_3 样地显著低于其他林分密度樟子松林地,而在 P_0 样地与其他密度样地无显著差异;在 60~80 cm 土层,土壤容重随着林分密度的增加呈 M 形变化,P_2 和 P_4 样地显著高于其他林分密度樟子松林地,但与 P_0 样地无显著差异,土壤孔隙度在 P_4 样地显著低于其他样地;在 80~100 cm 土层,土壤容重变化趋势与 60~80 cm 土层基本一致,土壤孔隙度在 P_2 样地最小且与 P_0 和 P_4 样地无显著差异,但显著低于其他样地。



注:不同小写字母表示相同土壤层次不同林分密度水平间差异显著,不同大写字母表示相同林分密度水平不同土壤层次间差异显著,显著水平 $P < 0.05$,图中 P_0 代表草地,P_1、P_2、P_3、P_4、P_5 分别代表 625、775、1 025、1 175、1 250 株·hm^{-2} 的林地。下同。

图 1 不同林分密度条件下土壤物理指标变化

Fig. 1 Change of soil physical indexes under different stand densities

2.2 不同林分密度樟子松林地土壤化学性质

樟子松固沙林土壤化学性质受林分密度的影响,而且不同土层土壤化学性质变化趋势存在差异。由图 2a 可以看出,在 0~10 cm 土层,土壤有机碳随着樟子松林林分密度的增加总体表现为先升高后降低,但不同密度林地间无显著差异,P_4 样地有机碳含量最高且显著高于 P_0 样地;在 40~60 cm 土层,P_2 样地土壤有机碳含量最低且显著低于其他样地;在 80~100 cm 土层,P_1 和 P_3 样地土壤有机碳含量显著低于其他样地;而在其他土层不同林分密度樟子松林地土壤有机碳含量无显著差异。

土壤全氮和水解氮含量分别在樟子松固沙林及其对照草地表现出优势(图 2b 和图 2c),在 0~100 cm 土层,土壤全氮含量在樟子松固沙林低于对照草地,而土壤水解氮含量则高于对照草地。随着樟子松固沙林林分密度的增加,在 0~10 cm 土层,土壤全氮呈先降低后升高趋势,P_2 样地土壤全氮含量最低,而土壤水解氮含量不同林分密度样地间无显著差异;在 10~20 cm 和 40~60 cm 土层,土壤全氮含量除 P_2 样地较低外总体呈逐渐降低趋势,土壤水解氮无明显变化;在 20~40 cm 和 60~80 cm 土层,土

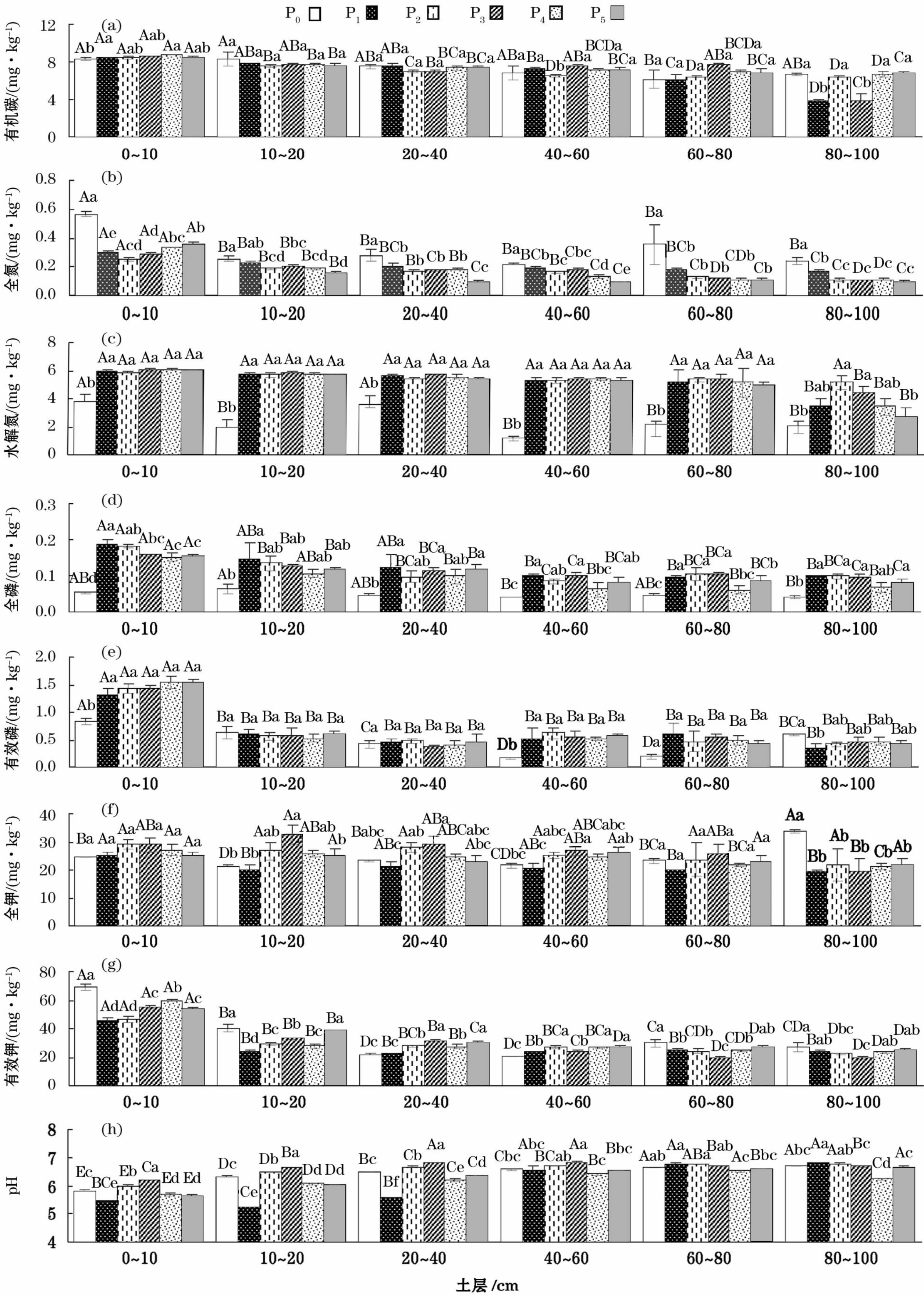


图2 不同林分密度条件下土壤化学指标变化

Fig. 2 Change of soil chemical indexes under different stand densities

壤全氮含量总体呈逐渐降低趋势,土壤水解氮仍无明显变化;在 80 ~ 100 cm 土层,土壤全氮含量总体仍呈逐渐降低趋势,而土壤水解氮含量则表现为先升高后降低,P_2 样地土壤水解氮含量最高。

土壤全磷和有效磷含量在樟子松固沙林及其对照草地不同土层存在差异(图 2d 和图 2e),在 0 ~ 100 cm 土层,樟子松林地土壤全磷含量均高于对照草地,在 10 ~ 20 cm 土层,樟子松林地土壤有效磷含量与对照草地无显著差异;在 80 ~ 100 cm 土层,樟子松林地土壤有效磷含量低于对照草地,而在其他土层,樟子松林地土壤有效磷含量高于对照草地。随着樟子松固沙林林分密度的增加,在 0 ~ 10 cm 土层,土壤全磷含量总体呈逐渐降低趋势;在 10 ~ 40 cm 土层,不同林分密度样地土壤全磷含量无显著差异;在 40 ~ 100 cm 土层,不同林分密度样地中土壤全磷含量在 P_4 样地最低,而在其他样地间无显著差异;不同林分密度样地土壤速效磷含量在 0 ~ 100 cm 土层均无显著差异。

土壤全钾和有效钾含量在樟子松固沙林及其对照草地不同土层变化较大(图 2f 和图 2g),在 0 ~ 100 cm 土层,樟子松林地土壤全钾含量与对照草地相比差异较小,仅 P_3 样地在 10 ~ 20 cm 和 40 ~ 60 cm 土层显著高于相应的对照草地,而樟子松林地土壤有效钾与对照草地在 0 ~ 100 cm 不同土层并无明显规律。随着樟子松固沙林林分密度的增加,在 0 ~ 10 cm 土层,土壤全钾含量并无显著差异,而土壤有效钾含量先升高后降低(P_4 样地最高);在 10 ~ 20 cm 土层,土壤全钾含量先升高后降低(P_3 样地最高),土壤有效钾含量在 P_5 样地最高,P_3 样地次之,二者显著高于其他样地;在 20 ~ 40 cm 土层,土壤全钾含量先升高后降低(P_3 样地最高),土壤有效钾在 P_3 和 P_5 样地显著高于其他样地;在 40 ~ 60 cm 土层,土壤全钾含量在 P_3 样地最高且显著高于 P_1 样地,土壤速效钾在 P_1 和 P_3 样地显著低于其他样地;在 60 ~ 80 cm 和 80 ~ 100 cm 土层,土壤全钾在不同林分密度样地无显著差异,土壤有效钾先降低后升高(P_3 样地最低)。

土壤 pH 变化受樟子松固沙林的营建及林分密度的变化影响显著(图 2h),草地土壤 pH 在不同土层基本处于不同林分密度樟子松固沙林的平均水平。随着樟子松固沙林林分密度的增加,在 0 ~ 60 cm 土层,土壤 pH 总体表现为先升高后降低(P_3 样地最高);在 60 ~ 100 cm 土层,土壤 pH 总体表现为先降低后升高(P_4 样地最低)。

3 讨论

土壤容重和孔隙度是反映土壤固体颗粒和孔隙状况的基本参数,是影响土壤通气性和透水性的重要指标,对土壤水源涵养功能的发挥起着决定作用[14]。本研究发现,随着樟子松固沙林林分密度的增加,0 ~ 20 cm 土层土壤容重无显著变化,0 ~ 40 cm 土层土壤孔隙度除在 10 ~ 20 cm 土层 P_5 样地显著低于 P_1 样地外,其他各样地间也无显著差异。在森林生态系统中,表层土壤条件的变化受多个因素调节,气候变化、枯落物生物量以及放牧干扰等均对其产生影响,不同林分密度樟子松林在 0 ~ 20 cm 土层土壤容重并无显著变化,且在 0 ~ 40 cm 土层土壤孔隙度也基本无显著差异,说明林分密度并不是该研究区樟子松固沙林表层土壤容重和孔隙度变化的主要因素;而不同林分密度樟子松林深层土壤容重和孔隙度的变化可能与林木的根系有关。肖兴翠等[15]研究认为,林分密度条件直接决定了林分根系生物量的变化,而林木根系的变化又直接对土壤容重和孔隙度产生影响。以往研究发现,中等密度的林分根系生物量较大[16-17],其根系脱落物以及根系分泌物的增加提高了土壤团聚性,所以,土壤容重在 P_3 样地相对于其他林分密度样地处于较低水平,而土壤孔隙度在 P_3 样地的深层也处于较低水平,研究区造林前为沙质草地,土壤属于风沙土,土壤孔隙大,保水保肥能力差,营造樟子松固沙林后,林木根长密度和根体积密度随林分密度的增加而显著升高[17],在樟子松林木根系和土壤微生物的共同作用下,土壤团聚性的增强使得土壤密度增加,土壤孔隙度减少,研究区土壤结构状况得到改善。

土壤 pH 值是影响土壤肥力、植物生长和微生物活动的重要因素之一,能够直接影响 C、N、P 的存在形态和转化方式,同时对养分元素的有效性产生一定的影响[18]。本研究发现不同密度林分土壤 pH 均随着土层深度的增加呈略微增加的趋势,这与赵广亮等[3]对油松人工林的研究结果相类似,由于样地土壤表层森林枯落物的分解产生大量的有机酸,相继盐基又从矿质土壤表层淋失出来所导致。随着林分密度的增加,0 ~ 60 cm 土层土壤 pH 均表现出先升高后降低的趋势,仅 P_2、P_3 样地的密度林分 pH 值略高于对照草地,说明低密度和高密度林分会引

起土壤酸化，而中密度林分更能保持土壤 pH 的稳定，孙嘉等[19]对华北落叶松的研究发现，高密度林分枯枝落叶的分解作用会引起 pH 降低，导致土壤酸化。

森林生态系统养分主要分布于土壤组分、植物组分和枯落物组分中，其中养分贮量最高的是土壤[20]。不同林分密度水平，樟子松固沙林土壤养分含量响应规律不同，并且在不同土层之间也存在差异。土壤有机碳在 0～20 cm 土层不同林分密度樟子松林地间无显著差异，但在 0～10 cm 土层土壤有机碳呈先升高后降低趋势，P_4 样地最高但不显著，这与邓继峰等[21]的研究结果基本一致。樟子松是北方典型针叶树种，自然更新凋落速度较慢[22]，其针叶凋落物富含单宁等不易分解物质，林分密度的增加使得光合作用效率增加、水分条件改善，土壤动物、微生物和酶活性增加，凋落物分解速率快，但随着林分密度进一步增大，林分逐渐达到郁闭，林内光照、水分条件变差[23-24]，凋落物分解缓慢，针叶留存时间长，针叶腐烂后分解不及时会累积下来[25]，造成土壤有机质累积于枯落物组分中。随着樟子松固沙林林分密度的增加，土壤全氮在 0～10 cm 土层先降低后升高，而在 10～20 cm 土层逐渐降低，这一差异是由 P_4 和 P_5 样地在 10～20 cm 土层土壤全氮含量降低引起的，土壤全磷含量在 0～20 cm 土层总体表现为先降低后升高，说明不同养分元素其循环机制存在差异，林分密度的增加使林木单株生长空间减小，对养分和空间的竞争更激烈[26]，消耗的土壤氮和磷的含量增加，而随着林分密度的持续增加，枯落物分解产生的氮和磷的含量可能高于林木的消耗，所以土壤中氮和磷的含量逐渐积累。土壤水解氮在 0～20 cm 土层随着林分密度的增加无显著差异，而土壤有效钾在 0～20 cm 土层的变化机制还有待进一步研究。樟子松固沙林的营建相较于天然沙质草地养分消耗增加，林木根系吸收深层土壤养分用于林木个体的生长发育，而养分元素又以枯落物的形式返还于土壤表层，造成土壤养分表聚性的发生。在 20～100 cm 土层随着樟子松固沙林林分密度的增加，土壤有机碳几乎无显著差异，仅 40～60 cm 土层 P_2 样地和 80～100 cm 土层 P_1、P_3 样地有显著变化，土壤全氮含量在低密度样地较高，而在高密度样地较低，但在 60～80 cm 土层无显著差异，土壤全磷含量在 20～40 cm 和 80～100 cm 土层无显著差异，而在其他土层较高密度樟子松林地土壤全磷含量较低。不同土层土壤有效磷均无显著差异，这与赵琼等[27]对不同密度沙地樟子松固沙林的研究结果基本一致，导致这一现象的原因可能与磷在土壤中的移动性和溶解性较差有关。钾元素养分释放较其他元素快，淋溶过程使枯落物中大量钾元素归还土壤[23]，本研究中，随林分密度的增加，全钾含量在 0～80 cm 土层呈先增加后降低的趋势，这一结果在马尾松林的研究中有一致的规律[28]。樟子松人工林中，在一定的林分密度范围内，0～60 cm 土层的有效钾含量随林分密度的增加而增加，表明林分密度增加对有效钾的积累有显著的促进作用。

合理的造林密度可以促进林木个体的生长状况，同时也能够改善土壤的结构及养分。Wang 等[29]研究发现，林分密度对落叶松人工林的土壤容重、孔隙度、全氮、全磷、有效氮、有效磷含量均有显著影响，并提出中等林分密度有利于改善土壤质量，陈莉莉等[5]对不同密度油松林的研究也支持这一结论。中等林分密度林地土壤养分含量较高[4]，养分利用率最大，当林分密度在中密度以下时，养分积累量随密度增大而增加，当林分密度在中密度以上时，养分积累量随密度的增大而减小，林分密度过低或过高都不利于人工群落养分的循环[3]。本研究发现 P_3 或 P_4 样地林分密度的樟子松人工林全氮、全磷、全钾含量高于其他林分密度，土壤孔隙度降低，土壤质量提高，说明中等密度（1 025 ～ 1 175 株 · hm^{-2}）在樟子松中龄林生长过程中较为适宜。

4 结 论

樟子松中龄林林分密度在 1 025～1 175 株 · hm^{-2}时，土壤全氮、全磷、全钾含量高于其他林分密度，土壤孔隙度降低，土壤质量提高。在樟子松人工固沙林经营管理过程中，通过间伐等措施使林分密度保持在 1 025～1 175 株 · hm^{-2}，有利于樟子松林地土壤理化性质保持较好的状态，为林木生长提供良好的土壤条件。

参考文献（References）：

［1］ 罗素梅，何东进，谢益林，等. 林分密度对尾赤桉人工林群落结构与生态效应的影响研究［J］. 热带亚热带植物学报，2010，18（4）：357－363.［Luo Sumei，He Dongjin，Xie Yilin，et al. Effect of stand density on community structure and ecological effect of *Eucalyptus urophylta* × *E. eamaldućensis* plantation［J］. Journal of

Tropical and Subtropical Botany,2010,18(4):357－363.〕
〔2〕 李国雷,刘勇,吕瑞恒,等.华北落叶松人工林密度调控对林下植被发育的作用过程〔J〕.北京林业大学学报,2009,31(1):19－24.〔Li Guolei,Liu Yong,Lü Ruiheng,et al. Responses of understory vegetation development to regulation of tree density in *Larix principis-rupprechtii* plantations〔J〕. Journal of Beijing Forestry University,2009,31(1):19－24.〕
〔3〕 赵广亮,王继兴,王秀珍,等.油松人工林密度与养分循环关系的研究〔J〕.北京林业大学学报,2006,28(4):39－44.〔Zhao Guangliang,Wang Jixing,Wang Xiuzhen,et al. Nutrient element cycling and density effect in *Pinus tabulaeformis* plantations〔J〕. Journal of Beijing Forestry University,2006,28(4):39－44.〕
〔4〕 康冰,刘世荣,蔡道雄,等.马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响〔J〕.应用生态学报,2009,20(10):2 323－2 331.〔Kang Bing,Liu Shirong,Cai Daoxiong,et al. Effects of stand density on understory vegetation and soil properties of *Pinus massoniana* Plantation〔J〕. Journal of Applied Ecology,2009,20(10):2 323－2 331.〕
〔5〕 陈莉莉,王得祥,张宋智,等.不同密度油松人工林土壤特性及水源涵养功能研究〔J〕.西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(7):141－149.〔Chen Lili,Wang Dexiang,Zhang Songzhi,et al. Soil properties and water conservation function of *Pinus tabulaeformis* plantation with different stand densities〔J〕. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition),2013,41(7):141－149.〕
〔6〕 赵汝东,樊剑波,何园球,等.林分密度对马尾松林下土壤养分及酶活性的影响〔J〕.土壤,2012,44(2):297－301.〔Zhao Rudong,Fan Jianbo,He Yuanqiu,et al. Effects of stand density on soil nutrients and enzyme activities in *Pinus massoniana* plantation〔J〕. Soils,2012,44(2):297－301.〕
〔7〕 朱教君,康宏樟,许美玲.科尔沁沙地南缘樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)人工林天然更新障碍〔J〕.生态学报,2007,27(10):4 086－4 095.〔Zhu Jiaojun,Kang Hongzhang,Xu Meiling. Natural regeneration barriers of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Southern Keerqin sandy land,China〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2007,27(10):4 086－4 095.〕
〔8〕 朱教君,姜凤岐.四大因素造成我国防护林衰退〔J〕.中国减灾,2006(11):42.〔Zhu Jiaojun,Jiang Fengqi. Four factors causing the decline of shelterbelt in China〔J〕. Journal of Disaster Reduction in China,2006(11):42.〕
〔9〕 雷泽勇,周晏平,赵国军,等.竞争对辽宁西北部樟子松人工固沙林树高生长的影响〔J〕.干旱区研究,2018,35(1):144－149.〔Lei Zeyong,Zhou Yanping,Zhao Guojun,et al. Effects of competition on tree height growth of sand-fixation plantations of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Northwest Liaoning Provinced〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(1):144－149.〕
〔10〕 张日升,肖巍,于红军,等.沙地樟子松人工林合理经营密度的研究〔J〕.辽宁林业科技,2014(4):12－15.〔Zhang Risheng,Xiao Wei,Yu Hongjun,et al. Study on rational management density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land〔J〕. Liaoning Forestry Science and Technology,2014(4):12－15.〕
〔11〕 张秋良,常金宝.沙地樟子松人工林初植密度及其调控研究〔J〕.中国农业生态学报,2001,9(3):35－37.〔Zhang Qiuliang,Chang Jinbao. Study on the initial planting density and its adjustment of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litvin. artificial forest in the sand land〔J〕. Journal of Eco-Agriculture,2001,9(3):35－37.〕
〔12〕 曾德慧,姜凤岐,范志平,等.沙地樟子松人工林自然稀疏规律〔J〕.生态学报,2000,20(2):235－242.〔Zeng Dehui,Jiang Fengqi,Fan Zhiping,et al. Self-thinning of even-aged pure plantations of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy soil〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2000,20(2):235－242.〕
〔13〕 鲍士旦.土壤农化分析〔M〕.北京:中国农业出版社,2005:25－114.〔Bao Shidan. Soil Agricultural Chemistry Analysis〔M〕. Beijing:China Agricultural Press,2005:25－114.〕
〔14〕 侯瑞萍,张克斌,郝智如.造林密度对樟子松人工林枯落物和土壤持水能力的影响〔J〕.生态环境学报,2015(4):624－630.〔Hou Ruiping,Zhang Kebin,Hao Zhiru. Effects of afforestation density on litter and soil water holding capacity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation〔J〕. Journal of Ecological Environment,2015(4):624－630.〕
〔15〕 肖兴翠,李志辉,梁明武,等.林分密度对湿地松根系生物量及其分布的影响〔J〕.福建林学院学报,2015(1):45－52.〔Xiao Xingcui,Li Zhihui,Liang Mingwu,et al. Effects of stand density on root biomass and its distribution of *Pinus elliottii*〔J〕. Journal of Fujian College of Forestry,2015(1):45－52.〕
〔16〕 Santantonio D,Santantonio E. Effect of thinning on production and mortality of fine roots in a *Pinus radiate* plantation on a fertile site in New Zealand〔J〕. Canadian Journal of Forest Research,1987,17(8):919－928.
〔17〕 徐程扬,张华,贾忠奎,等.林分密度和立地类型对北京山区侧柏人工林根系的影响〔J〕.北京林业大学学报,2007,29(4):95－99.〔Xu Chengyang,Zhang Hua,Jia Zhongkui,et al. Effects of stand density and site types on root characteristics of *Platycladus orientalis* plantations in Beijing mountainous area〔J〕. Journal of Beijing Forestry University,2007,29(4):95－99.〕
〔18〕 张剑,宿力,王利平,等.植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响——以敦煌阳关湿地为例〔J〕.生态学报,2019,39(2):580－589.〔Zhang Jian,Su Li,Wang Liping,et al. The effect of vegetation cover on ecological stoichiometric ratios of soil carbon,nitrogen and phosphorus:A case study of the Dunhuang Yangguan wetland〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2019,39(2):580－589.〕
〔19〕 孙嘉,王海燕,丁国栋,等.不同密度华北落叶松人工林土壤理化性质研究〔J〕.林业资源管理,2011(1):62－66.〔Sun Jia,Wang Haiyan,Ding Guodong,et al. Soil physico-chemical properties under *Larix principis-rupprechtii* plantations of different stand densities〔J〕. Forest Resources Management,2011(1):62－66.〕
〔20〕 刘增文,王乃江,李雅素,等.森林生态系统稳定性的养分原理〔J〕.西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(12):129－134.〔Liu Zengwen,Wang Naijiang,Li Yasu,et al. Nutritional principle of forest ecosystem stability〔J〕. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2006,34(12):129－134.〕
〔21〕 邓继峰,丁国栋,魏亚伟,等.毛乌素沙地南缘樟子松人工林土壤理化性质差异及其与林分生长的关系〔J〕.干旱区资源与环境,2017,31(8):160－166.〔Deng Jifeng,Ding Guodong,Wei Yawei,et al. Soil physiochemical properties and the relations with Mongolian pine growth in Southern Mu Us desert〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2017,31(8):160－166.〕
〔22〕 王媚臻,毕浩杰,金锁,等.林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响〔J〕.生态学报,2019,39(3):981－988.〔Wang Meizhen,Bi Haojie,Jin Suo,et al. Effects

of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of a *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(3):981 –988.]

[23] 陈婷,郗敏,孔范龙,等. 枯落物分解及其影响因素[J]. 生态学杂志,2016,35(7):1 927 – 1 935. [Chen Ting, Xi Min, Kong Fanlong, et al. A review on litter decomposition and influence factors[J]. Chinese Journal of Ecolog,2016,35(7):1 927 –1 935.]

[24] 于德良,雷泽勇,张岩松,等. 沙地樟子松人工林土壤酶活性及其影响因子[J]. 干旱区研究,2019,36(3):621 –629. [Yu Deliang, Lei Zeyong, Zhang Yansong, et al. Soil enzyme activity and its affecting factors under *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land[J]. Arid Zone Research,2019,36(3):621 –629.]

[25] 姜一,步凡,张超,等. 土壤有机磷矿化研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2014,38(3):160 –166. [Jiang Yi, Bu Fan, Zhang Chao, et al. Research advances on soil organic phosphorus mineralization[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition),2014,38(3):160 –166.]

[26] 李博,陈家宽,沃金森 A R. 植物竞争研究进展[J]. 植物学报,1998,15(4):18 –29. [Li Bo, Chen Jiakuan, Waugh Higginson A R. Advances in plant competition[J]. Chinese Bulletin of Botany,1998,15(4):18 –29.]

[27] 赵琼,曾德慧,陈伏生,等. 沙地樟子松人工林土壤磷库及其有效性初步研究[J]. 生态学杂志,2004,23(5):224 –227. [Zhao Qiong, Zeng Dehui, Chen Fusheng, et al. Preliminary study on soil phosphorus pool and its effectiveness of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land[J]. Chinese Journal of Ecology,2004,23(5):224 –227.]

[28] 孙千惠,吴霞,王媚臻,等. 林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(3):732 –738. [Sun Qianhui, Wu Xia, Wang Meizhen, et al. Effects of stand density on species diversity and soil physicochemical properties under *Pinus massoniana* forest[J]. Journal of Applied Ecology,2018,29(3):732 –738.]

[29] Wang S L, Ma C, Yuan W B. Soil physical and chemical properties under four densities of hybrid larch plantationst[J]. Advanced Materials Research,2012,524 –527:2 139 –2 142.

Response of Soil Physiochemical Properties under Sand-Fixation Forest of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to Stand Density

YU Dong-wei[1], LEI Ze-yong[1], ZHAO Guo-jun[2], ZHANG Yan-song[3,4], YU De-liang[1], BAI Jin-ning[1], LI Yao[1]

(1. *College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin* 123000, *Liaoning, China*;
2. *Liaoning Institute of Sandy Land Management, improvement and Utilization, Fuxin* 123000, *Liaoning, China*;
3. *Daqinggou Ecological Station, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang* 110016, *Liaoning, China*;
4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In this study, the 23 –27 – year aged forests with stand densities of 625 (P_1), 775 (P_2), 1 025 (P_3), 1 175 (P_4) and 1 250 (P_5) plants/ha in the Zhanggutai region were selected. The purpose of the study was to analyze the effect of stand density on soil physiochemical properties at 0 –100 cm depth. The results showed that the total nitrogen content in 0 –10 –cm soil layer and the bulk density in 20 –40 –cm soil layer increased with the increase of stand density, and the total nitrogen content and bulk density in plot P_5 were significantly higher than those in plot P_1 ($P<0.05$). The total potassium content in 0 –80 –cm soil layer and the pH value in 0 –60 –cm soil layer increased at first and then decreased with the increase of stand density, and they were the highest in plot P_3. The total potassium content in 10 –60 –cm soil layer in plot P_3 was significantly higher than that in plot P_1 ($P<0.05$), and the pH value in 0 –40 –cm soil layer was significantly higher than that in other plots ($P<0.05$). The total phosphorus content in 0 –10 –cm soil layer decreased with the increase of stand density, and it in plot P_1 was significantly higher than that in plots P_3 – P_5 ($P<0.05$). The available potassium content in 0 –40 –cm soil layer in plot P_4 or P_5 was significantly higher than that in plots P_1 and P_2 ($P<0.05$), and also significantly higher than that in 40 –100 –cm soil layer in plot P_3 ($P<0.05$). The porosity in 40 –100 –cm soil layer in plots P_2 – P_4 was lower than that in plots P_1 and P_5. Considering the influence of stand density on soil physiochemical properties of middle-aged *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation, the rational stand density of *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation in the study area should be 1 025 –1 175 plants · hm^{-2}. Intermediate cuttings and other forest management measures could be taken to regulate the stand density so as to ensure the good soil conditions for the growth of sand-fixing forests of *P. sylvestris* var. *mongolica*.

Key words: *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; plantation; stand density; soil property; soil layer; Zhanggutai region